Author/Autore
Ana Mangas
AIMPLAS



New generation of sustainable flame-retardant coatings for wood

The need to develop more sustainable flame-retardant materials is now a real technological priority rather than a mere trend. Sectors such as construction, technical furniture, transport, and advanced interior design demand coatings capable of reducing fire spread, limiting heat release, and minimizing smoke emissions, especially when applied to combustible substrates such as wood or wood-based panels. However, these performance requirements must coexist with an increasingly restrictive regulatory and environmental framework, where it is no longer enough for an additive to be effective against fire: it must also align with chemical safety criteria, emission reduction, efficient use of resources, and, where possible, the incorporation of renewable raw materials. This paradigm shift is profoundly transforming the development of flame retardants. Traditionally, many flame-retardant systems have relied on petrochemical raw materials, solution-based synthetic routes, and manufacturing processes intensive in solvents, energy, and purification steps. Although these technologies have enabled the production of high-performance functional additives, they present significant limitations from the perspective of industrial sustainability. Solvent consumption, waste generation, variability associated with multi-step processes, and the difficulty of achieving clean, continuous scale-up are factors that now decisively affect the viability of new solutions.

In this context, sustainability in flame-retardant materials must be understood in a dual dimension. On the one hand, there is the sustainability of the material itself - the possibility of designing flame retardants from partially or fully bio-based precursors or at least reducing dependence on conventional fossil-based building blocks. On the other hand, there is the sustainability of the manufacturing process, which involves rethinking synthesis from the perspective of process intensification, operational simplification, and environmental impact minimization. It is precisely in this second aspect where mechanochemistry is gaining increasing interest as an advanced synthesis route.

Nuova generazione di pitture ritardanti di fiamma sostenibili per legno

L'esigenza di sviluppare materiali ritardanti di fiamma sostenibili è diventata una priorità tecnologica più che una semplice tendenza. Settori quali quelli delle costruzioni, dell'arredamento, del trasporto e del design d'interni richiedono rivestimenti in grado di ridurre la propagazione della fiamma, limitando il rilascio del calore e le emissioni di fumo, specialmente quando sono applicati su substrati combustibili quale il legno o i pannelli di legno. Tuttavia, questi requisiti prestazionali devono coesistere con una struttura legislativa e ambientale sempre più restrittiva, dove non è più sufficiente che un additivo sia efficace contro le fiamme: deve anche allinearsi ai criteri di sicurezza chimica, di riduzione delle emissioni, di un uso efficiente delle risorse e, laddove possibile, con l'incorporazione di materie prime rinnovabili. Questo cambiamento di paradigma sta trasformando profondamente lo sviluppo dei ritardanti di fiamma. Da sempre, molti sistemi ritardanti di fiamma si affidano a materie prime di origine fossile, a percorsi di sintesi basati sulla soluzione e a processi produttivi intensivi nelle fasi solvente, energia e raffinazione. Sebbene queste tecnologie abbiano consentito di produrre additivi funzionali di alta prestazione esse presentano dei limiti significativi dal punto di vista della sostenibilità in ambito industriale. Il consumo di solvente, la generazione di scarti, la variabilità associata ai processi multifase e la difficoltà di ottenere una progressione continua e pulita sono fattori che influiscono in modo decisivo sulla fattibilità di nuove soluzioni.

In questo contesto, la sostenibilità dei materiali ritardanti di fiamma deve essere compresa in una dimensione doppia. D'altra parte, esiste una sostenibilità del materiale stesso come la possibilità di progettare ritardanti di fiamma dai precursori interamente o parzialmente bio o almeno di ridurre la dipendenza da componenti chimici di origine fossile. D'altronde, esiste la sostenibilità del processo di produzione, che implica il ripensamento della sintesi dalla prospettiva di un'accelerazione di processo, semplificazione operativa e di riduzione al minimo dell'impatto sull'ambiente. È proprio in questo secondo aspetto dove la meccanochimica sta polarizzando sempre più interesse



Fig. 1 - Fire behavior of reference MDF panel (black), sustainable flame-retardant formulation (green), and commercial flame retardants (orange)

Risposta alla fiamma del pannello di riferimento MDF (nero), della formulazione di ritardante di fiamma sostenibile (verde) e dei ritardanti di fiamma in commercio (arancione)

Mechanochemistry allows chemical reactions to be induced through mechanical energy, avoiding or drastically reducing the use of solvents and enabling more compact, faster, and potentially scalable processes. Although it has been traditionally perceived mainly as a laboratory tool, its integration into continuous technologies such as twin-screw extrusion is now opening an especially attractive scenario for the production of functional additives at pre-industrial and industrial scale. Within this framework lies the REFUGI project, aimed at developing sustainable phosphorus-based flame retardants obtained through continuous mechanosynthetic routes and validated in varnish formulations applied to wood substrates.

From laboratory mechanochemistry to continuous synthesis in reactive extrusion

In this context, one of the major challenges is not only identifying new molecules with flame-retardant potential but also finding manufacturing routes that allow them to be produced in a cleaner, more robust, and more transferable way. This is where mechanochemistry begins to gain particular relevance. Compared to conventional synthetic approaches based on liquid media and longer process sequences, mechanical activation enables the generation of functional materials from a different logic: reduced solvent dependence,

come percorso di sintesi avanzato.

La meccanochimica consente reazioni chimiche indotte dall'energia meccanica, evitando o riducendo drasticamente l'utilizzo di solventi e consentendo processi più compatti, più veloci e potenzialmente scalabili. Sebbene sia stata sempre interpretata principalmente come strumento di laboratorio, la sua integrazione nelle tecnologie continue come nel caso dell'estrusione bivite sta dando vita a uno scenario molto interessante per la produzione di additivi funzionali su scala preindustriale e industriale. In questa cornice si colloca il progetto REFUGI, finalizzato allo sviluppo di ritardanti di fiamma a base di fosforo sostenibile, ottenuto attraverso percorsi meccanosintetici continui, convalidati nelle formulazioni di vernici applicate su substrati d legno.

Dalla meccanochimica di laboratorio alla sintesi continua nell'estrusioni reattiva

In questo contesto, una delle maggiori sfide non consiste solo nell'individuare nuove molecole con effetto potenziale ritardante di fiamma, ma anche trovare percorsi produttivi che consentano una produzione più pulita, consistente e trasferibile. Questo è il punto in cui la meccanochimica inizia a acquisire una particolare importanza. Rispetto alle tecniche di sintesi convenzionali, basate su veicoli liquidi e sequenze di processo più lunghe, l'attivazione meccanica consente di generare materiali funzionali che attengono a differenti aspetti:

fewer intermediate steps, and greater compatibility with continuous production schemes. This shift becomes especially significant when mechanochemistry moves beyond the laboratory and is integrated into continuous processing technologies with clear industrial potential. Twin-screw reactive extrusion represents, in this regard, a particularly attractive platform, combining intensive mixing capability, thermal control, process continuity, and scalability. Applied to the development of flame retardants, this approach not only allows the exploration of new synthesis routes but also brings the resulting materials closer to real formulation and application environments. Within this framework, the REFUGI project focuses on developing sustainable phosphorus-based flame-retardant additives through a continuous mechanosynthetic strategy and validating them in varnish coatings for lignocellulosic substrates. Beyond the chemical interest of the compounds obtained, the value of the approach lies in demonstrating that functional materials can be produced through an intensified manufacturing route with clear scalability potential and subsequently evaluated for their fire performance in practical systems.

Using this platform, different families of phosphorus and phosphorus–nitrogen-based materials were developed, including partially or fully bio-based compositions. The aim was not only to obtain new additives but also to determine whether they could deliver competitive fire performance once incorporated into real varnish formulations. In other words, the goal was not to demonstrate improvements in isolated tests on synthesized powders, but to validate a complete technological proposal: functional origin of the additive, sustainable manufacturing process, and final performance in application.

Sustainable flame-retardant materials: from chemical design to end use

One of the most relevant aspects of the work is that sustainability was addressed holistically. On the one hand, chemical building blocks with high flame-retardant functionality were explored, in several cases with renewable or partially renewable origin. On the other hand, the production process was conceived from the outset as an alternative to more solvent-intensive routes and post-processing operations. This combination is particularly interesting because it enables progress toward additives that are not only effective but also consistent with current requirements for responsible manufacturing.

However, in the field of flame retardants, the decisive criterion remains real performance under use conditions. For this reason, the materials developed in REFUGI were incorporated into solvent-based varnishes and applied to MDF panels, a highly representative substrate due to its widespread use in interior construction, furniture, and cladding. This validation phase

dipendenza inferiore dal solvente, meno fasi intermedie e superiore compatibilità con schemi produttivi continui. Questa transizione diventa particolarmente significativa quando la meccanochimica va oltre il laboratorio ed è integrata nelle tecnologie di processo continue con evidenti potenzialità industriali. L'estrusione reattiva a vite doppia rappresenta in questo caso una piattaforma molto interessante, in quanto associa in sé capacità di miscelazione intensiva, controllo termico, continuità di processo e scalabilità. Applicato allo sviluppo dei ritardanti di fiamma, questo approccio non solo consente di esplorare nuovi percorsi di sintesi, ma avvicina anche i materiali alla formulazione e agli ambienti di applicazione. In questa cornice il progetto REFUGI si concentra sullo sviluppo sostenibile degli additivi a base di fosforo ritardanti di fiamma grazie a una strategia meccanosintetica per poi confermarne l'efficacia nei rivestimenti di vernice per substrati di lignocellulosa. Oltre all'interesse chimico dei composti ottenuti, il valore della tecnica deriva dalla dimostrazione del fatto che i materiali funzionali possono essere prodotti con un percorso produttivo intensificato con una chiara scalabilità potenziale per poi essere valutati nella prestazione antifiamma nei sistemi pratici. Grazie a questa piattaforma, sono state sviluppate diverse famiglie di materiali a base di fosforo e fosforo-azoto fra cui composizioni parzialmente o interamente bio. Lo scopo non era soltanto ottenere nuovi additivi, ma anche determinare se si fosse potuto prevedere una prestazione antifiamma competitiva, una volta incorporati nelle formulazioni reali di vernici. In altre parole, l'obiettivo non era dimostrare miglioramenti in test isolati su polveri sintetizzate, ma convalidare una proposta tecnologica completa: origine funzionale dell'additivo, processo produttivo sostenibile e prestazione finale nell'applicazione.

Materiali ritardanti di fiamma sostenibili: dalla chimica all'utilizzo finale

Uno degli aspetti più rilevanti del lavoro è che la sostenibilità è stata affrontata dal punto di vista olistico. Da una parte, sono stati esplorati i componenti chimici strutturali con funzionalità ritardante di fiamma, in molti casi di origine rinnovabile o parzialmente rinnovabile. Da un'altra, il processo produttivo è stato sviluppato fin dall'inizio come alternativa a percorsi con utilizzo intensivo di solvente e alle operazioni post-trattamento. Questa combinazione è particolarmente interessante perché permette un'evoluzione verso additivi che non sono soltanto efficaci ma anche conformi ai requisiti attuali per un processo produttivo responsabile.

Tuttavia, nel campo dei ritardanti di fiamma, il criterio fondamentale rimane la prestazione effettiva in condizioni d'uso. Per questa ragione, i materiali messi a punto nel progetto REFUGI sono stati incorporati nelle vernici a base solvente e applicati su pannelli MDF, un substrato molto rappresentativo per il suo uso molto diffuso nelle costruzioni di interni, arredamento e rive-

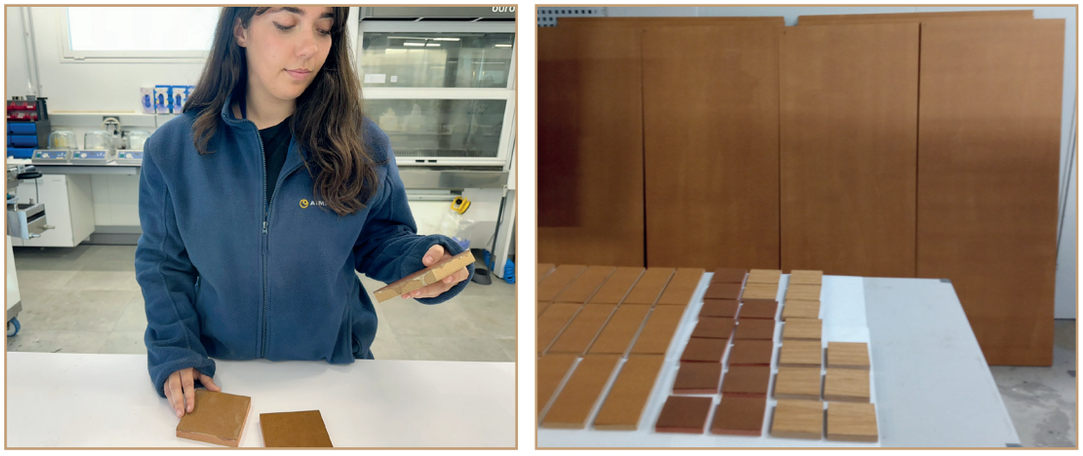


Fig. 2 - Difference between LMWD and HMWD on pigment particle
Differenza tra LMWD e HMWD su una particella di pigmento

was essential, as the fire response of an additive depends not only on its chemical nature but also on its interaction with the matrix, its dispersion, compatibility, and the way it contributes to forming protective barriers during combustion. The results obtained show that several of the developed formulations achieve highly competitive performance compared to commercial references tested within the same system. In particular, some families exhibited peak heat release rate (pHRR) values in the range of 85–90 kW/m², along with FIGRA values around 0.09–0.10 kW/m² ·s, indicating a clear reduction both in maximum fire intensity and in fire growth rate. Additionally, there was a significant reduction in sustained heat release, reflected in low MARHE values, as well as particularly low smoke production in several compositions. This last aspect is especially important. In many real scenarios, smoke is one of the most critical safety factors, not only because of its potential toxicity but also due to reduced visibility and its direct impact on evacuation times. In this regard, some REFUGI formulations showed total smoke production (TSP) values much lower than those observed in commercial reference solutions, while maintaining competitive pHRR and FIGRA levels. This is a particularly valuable combination, as a good thermal severity response is not always accompanied by equally significant emission reductions.

Results beyond peak heat reduction

Another noteworthy result was the behavior observed in terms of ignition delay and the temporal shift of the peak heat release. Some formulations showed clearly increased ignition times and a significantly delayed peak heat release, suggesting a capacity not only to reduce fire intensity but also to slow its development. From a safety perspective, this effect can be as relevant as the reduction of the thermal peak

stimento. Questa fase di validazione è stata essenziale, dal momento che la risposta alla fiamma di un additivo dipende non solo dalla sua natura chimica ma anche dalle interazioni con la matrice, dalla sua dispersione, compatibilità e dal modo in cui contribuisce a formare barriere protettive durante la combustione. I risultati ottenuti mostrano che diverse formulazioni messe a punto offrono una prestazione molto competitiva rispetto ai prodotti di riferimento in commercio testati nello stesso sistema. In particolare, alcuni gruppi hanno mostrato valori massimi di rilascio di calore (pHRR), nel range di 85-90 kW/m², oltre ai valori FIGRA pari a 0,09-0,10 kW/m² al secondo, a indicare una chiara riduzione della fiamma e del tasso di sviluppo della fiamma. Inoltre, si è osservata una riduzione significativa del rilascio del calore sostenuto, testimoniata dai valori ridotti MARHE, così come la ridotta produzione di fumo in varie composizioni. Questo ultimo aspetto è particolarmente importante. In molti scenari reali, il fumo è uno dei fattori di sicurezza più critici, non solo per la sua tossicità potenziale ma anche per la ridotta visibilità e l'impatto indiretto sui tempi di evacuazione. A tal riguardo, alcune formulazioni REFUGI hanno mostrato valori totali di produzione di fumo (TSP) di molto inferiori rispetto a quelli osservati nelle soluzioni in commercio, pur mantenendo i livelli pHRR e FIGRA. Si tratta di una combinazione particolarmente valida, perché una buona risposta alla criticità termica non è sempre accompagnata da riduzioni ugualmente significative di emissioni.

I risultati oltre la riduzione dei valori massimi di calore

Un altro importante risultato è rappresentato dalla risposta osservata in termini di ritardo dell'ignizione e di transizione temporale del rilascio del picco massimo di calore. Alcune formulazioni hanno mostrato tempi allungati di ignizione e un ritardo significativo del rilascio di calore nei suoi valori massimi, il che suggerisce la capacità non soltanto di ridurre l'intensità della fiamma ma anche di rallentarne lo sviluppo. Dal punto di vista della sicurezza, questo effetto può essere importante tanto quanto la riduzione del picco termico stesso perché offre una finestra temporale aggiuntiva per la conservazione, la risposta o l'evacuazione. Inoltre, diverse composizioni hanno dimostrato valori di perdita della massa pari a 0 durante il test. Ciò indica la formazione di un residuo protettivo stabile in grado di agire

itself, as it provides an additional time window for detection, response, or evacuation. Furthermore, several compositions exhibited zero mass loss during the test. This indicates the formation of a stable protective residue capable of acting as a physical barrier against heat propagation and mass transfer. In the context of coatings on wood, this behaviour is particularly interesting because it suggests that the system does not merely act as a dispersed additive but actively contributes to forming an effective protective structure during thermal exposure.

Among the different families studied, distinct performance profiles were observed. Some compositions stood out due to a well-balanced combination of low pHRR, low FIGRA, and reduced smoke; others showed particularly outstanding performance in terms of ignition delay or reduction of sustained heat release. This internal diversity is, in fact, one of the strengths of the work, as it demonstrates that the developed platform does not lead to a single closed solution but rather to a family of materials that can be tailored according to application requirements.

Technological relevance and potential impact

The interest of these results lies not only in achieving strong fire performance data, but in the fact that these results stem from a strategy that combines functional chemical design, sustainable manufacturing, and compatibility with real formulations. In other words, the project demonstrates not only that flame retardants can be synthesized via continuous mechanosynthetic routes, but also that these materials can be integrated into varnishes applicable to industrial substrates and compete with existing market solutions. This has important implications at several levels. From a process perspective, it reinforces the idea that mechanochemistry can move beyond the academic sphere and become a real manufacturing tool for functional additives. From a product perspective, it opens the door to flame retardants with a potentially lower process footprint and the possibility of incorporating bio-based raw materials. From a sectoral perspective, it provides a promising pathway for developing next-generation coatings in applications where fire safety is critical, but so are sustainability, aesthetics, and compatibility with existing industrial lines.

In summary, REFUGI shows that the development of sustainable flame retardants should no longer be understood as a mere substitution of raw materials, but as a complete redefinition of the value chain, from synthesis to final application. The combination of continuous mechanochemistry, phosphorus-based functional building blocks, and validation in varnishes for wood enables progress toward solutions that more coherently meet current technological demands: safer materials, cleaner processes, and a much closer path to industrial implementation.

The project is part of the IVACE+i funding program aimed

da barriera fisica contro la propagazione del calore e il trasferimento della massa. In questo contesto di rivestimenti su legno, questa risposta è particolarmente interessante perché suggerisce che il sistema non agisce solo come additivo disperso, ma contribuisce attivamente a formare una struttura protettiva efficace durante l'esposizione termica. Fra le categorie differenti che sono state studiate, sono stati osservati diversi profili di prestazione. Alcune composizioni si sono distinte grazie ad una combinazione ben bilanciata di bassi valori pHRR, FIGRA e livelli ridotti di fumo; altre hanno offerto una prestazione molto interessante in termini di ritardo dell'ignizione o di riduzione del rilascio di calore sostenuto. Questa diversità interna è, di fatto, uno dei punti di forza del lavoro in quanto dimostra che la piattaforma che è stata messa a punto non fornisce un'unica soluzione chiusa ma una categoria di materiali che possono essere personalizzati in base ai requisiti applicativi.

La rilevanza tecnologica e l'impatto potenziale

L'interesse rivestito da questi risultati non sta soltanto nel raggiungere dati relativi ad una prestazione antifiamma forte, ma nel fatto che essi derivano da una strategia che combina la progettazione chimica, la produzione sostenibile e la compatibilità con le formulazioni reali. In altre parole il progetto dimostra non soltanto che i ritardanti di fiamma possono essere sintetizzati con i percorsi meccanosintetici continui, ma anche che questi materiali possono essere integrati nelle vernici applicabili su substrati d'uso industriale e competere con le soluzioni già esistenti sul mercato. Questo ha implicazioni importanti a vari livelli. Dalla prospettiva del processo, rinforza l'idea che la meccanochimica può andare oltre la sfera accademica e diventare uno strumento di produzione reale per additivi funzionali. Dal punto di vita del prodotto, esso apre le porte ai ritardanti di fiamma con un'impronta di processo potenzialmente inferiore oltre alla possibilità di incorporare materie prime bio. Dal punto di vista settoriale, esso avvia un percorso promettente per lo sviluppo di rivestimenti di generazione futura in applicazioni in cui la sicurezza anti-incendio è fondamentale, ma così come la sostenibilità, l'estetica e la compatibilità con le linee industriali esistenti.

In conclusione, REFUGI dimostra che lo sviluppo di ritardanti di fiamma sostenibili non dovrebbe essere più considerato come una semplice sostituzione di materie prime, ma come una ridefinizione completa della catena di valore, dalla sintesi all'applicazione finale. La combinazione di meccanochimica continua, di blocchi strutturali funzionali a base di fosforo e la convalida nelle vernici per legno permette di progredire verso soluzioni che sono sempre più conformi ai requisiti tecnologici attuali: materiali più sicuri, processi più puliti e un percorso molto vicino all'implementazione industriale.

Il progetto è parte integrante del programma di finanziamenti IVACE+i mirato ai centri tecnologici nella comunità di Valenza per progetti R&D non a scopo di lucro, svolti in collabora-

at technology centres in the Valencian Community for non-economic R&D projects carried out in collaboration with companies for the 2024 call, financed by the European Regional Development Fund (ERDF) of the European Union within the 2021–2027 Operational Programme.

References

1 MDF (Medium Density Fiberboard): a medium-density wood fiberboard obtained by defibration and pressing with resins, used as a lignocellulosic substrate in fire reaction tests.
2 pHRR (peak Heat Release Rate): maximum value of the heat release rate (kW/m²) during combustion, indicating the peak intensity of the fire.
3 FIGRA (Fire Growth Rate Index): index that relates the rate of fire development to heat release; the lower the value, the lower the contribution to fire growth.
4 MARHE (Maximum Average Rate of Heat Emission): maximum average rate of heat emission over the course of the test, a parameter representing the overall severity of the fire.
5 TSP (Total Smoke Production): total amount of smoke generated during combustion (m²), associated with smoke load and visibility during a fire.

zione con le aziende per la domanda 2024, finanziato con il Fondo per lo Sviluppo Regionale Europeo (ERDF) dell'Unione europea nell'ambito del Programma Operativo il 2021-2027.

Note

1 MDF (truciolato a densità media): un truciolato di densità media ottenuto dall'estrazione delle fibre e dalla pressatura con le resine, utilizzate come substrato di lignocellulosa nei test della reazione alle fiamme.
2 pHRR (Grado massimo di rilascio di calore): valore massimo del grado di rilascio di calore (kW/m²) durante la combustione, a indicare l'intensità del picco della fiamma.
3 FIGRA (Indice del grado di crescita della fiamma): indice che si riferisce al grado di sviluppo della fiamma e del rilascio di calore; quanto più è basso il valore, minore è il contributo allo sviluppo della fiamma.
4 MARHE (Grado medio massimo di emissione di calore): media massima di emissione di calore nel corso del test, un parametro che rappresenta la severità generale della fiamma.
5 TSP (Produzione Totale di fumo): quantità totale di fumo generato durante la combustione (m²), associato al carico di fumo e alla visibilità durante l'incendio.

DEPUR PADANA ACQUE S.R.L.
VIA MAESTRI DEL LAVORO, 3
45100 ROVIGO - ITALY

TEL. +39 0425.47.22.11
INFO@DEPURPADANA.IT
WWW.DEPURPADANA.COM

DEPUR PADANA® ACQUE
IMPIANTI DI DEPURAZIONE

ECOSAR® CFA/O
CFA/S
Potenzialità: 300 | 500 | 1.000 | 2.000 lt/h



ECOSAR® PLM
Potenzialità: da 2.000 fino a 50.000 lt/h



ESPERIENZA CONSOLIDATA
Impianti specifici per la depurazione delle acque di scarico dei colorifici